文章编号：　1007-4627(2025) 00-0080-07

AMPT 模型下 d-Au 碰撞非流贡献对椭圆流的影响研究

章媚媚[1, 2, 3, 4]，李双 ⋆[1, 2]，张祖满 †[3, 4]

(1. 三峡大学数理学院，湖北宜昌 443002；
2. 三峡大学天文与空间科学研究中心，湖北宜昌 443002；
3. 湖北第二师范学院物理与机电工程学院，湖北武汉 430205；
4. 湖北第二师范学院理论物理研究所，湖北武汉 430205)

摘要：本研究运用多相输运模型（A Multi-Phase Transport，AMPT）分析了 d-Au 在 200 GeV 碰撞能量下产生的带电强子椭圆流（v_2）分布特性，重点探究了在该小碰撞系统中非流源（如喷注碎片和共振衰变等）对 v_2 的影响。利用非流贡献减除方法，即从 d-Au 中心碰撞（中心度 0-5%）的带电强子产额中减去相同碰撞能量下 d-Au 边缘碰撞（中心度 60-100% 或 80-100%）或 pp 碰撞的带电强子产额，消除非流效应的影响，并系统研究了非流效应对带电强子 v_2 的影响，以及 v_2 对不同减除方案的依赖性。研究发现，非流贡献减除后的理论计算能够更好地描述现有实验数据；不同减除方案的理论预言相近。本研究从理论上证明了，在非流贡献减除方法中，减除边缘碰撞或 pp 碰撞结果对最终理论预言的影响较小，这为科研人员在小碰撞系统实验中去除非流贡献提供了理论依据，相关理论计算也为后续实验测量提供了理论参考。

关键词：多相输运模型（AMPT）；非流贡献减除；d-Au 碰撞；椭圆流（v_2）
中图分类号：O571.53　　**文献标志码：**A　　**DOI：**10.11804/NuclPhysRev.41.01.80

引言

极端相对论重离子碰撞实验的核心目标之一是探索在极端高温或高净重子数密度条件下，强相互作用物质的新形态——夸克-胶子等离子体（Quark-Gluon Plasma, QGP)[1-2]。该物质形态广泛被认为曾在大爆炸后宇宙早期的数微秒内出现，并可能在当前宇宙中致密的中子星内部形成。重离子碰撞最早由李政道先生在 1970 年提出，其设想是通过将重核加速至接近光速进行对撞来达到极端条件，从而产生大量新粒子。这一设想后经研究者们证实，并开辟了利用相对论重离子碰撞来研究 QGP 的新领域。对 QGP 的深入研究不仅有助于揭示早期宇宙的演化过程，同时也为理解物质世界的基本结构和强相互作用的本质提供关键理论依据。

在相对论重离子碰撞研究领域，一个关键的可观测量是碰撞末态粒子的方位各向异性流[3-4]，它提供了关于 QGP 的状态方程特性及其集体运动特征。通过对粒子在横动量空间的方位分布进行傅里叶展开，能够获得二阶系数椭圆流（v_2）。v_2 作为研究 QGP 集体运动的关键可观测量，可以提供关于 QGP 集体运动行为及其性质的重要结果。因此，研究重离子碰撞中末态粒子的方位各向异性流不仅是高能重离子碰撞实验的核心内容之一，也是加深对 QGP 及其特性理解的重要途径。

为深入理解冷核物质对重离子碰撞测量的影响，有研究者对小碰撞系统 p(d)+A 碰撞进行了系列研究。研究重点在于探索小碰撞系统中冷核物质效应的几个关键方面，包括部分子分布函数的修正[5]、部分子内禀横动量的拓宽[6] 以及冷核物质中的能量损失[7]。值得注意的是，在小碰撞系统中，使用两粒子方位关联方法，ALICE、ATLAS 和 CMS 合作组在质心系能量 $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV 的中心快度区域[8-12] 以及 LHCb 合作组在前向快度区域[13] 的 p+A 碰撞中，发现两粒子长程关联下强子的 v_2 值为正。此外，在较低的束流能量下，PHENIX 和 STAR 合作组在 RHIC 的 d-Au[14-17] 和 ^{3}He-Au 碰撞[18] 中也观测到强子长程关联结果。

在相对论重离子碰撞过程中，带电强子分布呈现各向异性，这种各向异性主要是由介质在早期阶段的流体动力学膨胀引起，表现为系统整体的集体运动。然而，除流体动力学膨胀这一主流机制外，还存在其他非流动力学效应，它们也可能对各向异性的表征量椭圆流 v_2 产生影响[19-20]。这些非流效应包括喷注碎片、共振衰变等，它们并非源自系统的集体运动，而是由局部区域内的动

收稿日期：2025-03-10；　**修改日期：**2025-03-10
基金项目：国家自然科学基金（12375137）；华中师范大学夸克与轻子物理教育部重点实验室开放基金（QLPL2024P01）
作者简介：章媚媚(2001–), 女, 湖北黄冈人, 硕士研究生, 从事相对论重离子碰撞物理研究; E-mail: 202307020021022@ctgu.edu.cn
通信作者：E-mail: lish@ctgu.edu.cn
通信作者：E-mail: zuman.zhang@hue.edu.cn

力学过程导致[21-22]。由于这些非流效应会增大 v_2[22-23]，因此，对它们进行精确量化成为了高能物理领域理论研究和实验观测的关键课题。

为定量分析非流效应的贡献，相对论重离子碰撞领域的研究者们已经开发出多种方法来消除与末态带电强子（包括 π 介子、K 介子和质子）v_2 无关的关联[24]，这些关联来源于喷注碎片、共振衰变等。在小碰撞系统实验中, 常见做法是减去在边缘中心度碰撞[9,25] 或质子-质子（pp）碰撞[17,26] 中的关联，从而去除这些非流贡献。接着研究者使用拟合方程[27] 拟合减去非流贡献的两关联带电强子方位角产额分布，计算并得到两关联带电强子 v_2 结果。

在本研究中，运用多相输运（AMPT）模型[28-31] 计算 200 GeV 的 d-Au 碰撞中两关联带电强子横动量分布，旨在研究来自 d-Au 边缘碰撞和 pp 碰撞的非流贡献减除方法，对比采用两种方法去除非流贡献的 v_2 结果，并探讨选取不同具体中心度边缘碰撞对两种减除方法 v_2 结果差异的影响，为科研人员在小碰撞系统实验中去除非流贡献提供理论参考。

1　事件生成和各向异性流的定义

1.1　多相输运（AMPT）模型

AMPT 模型[28-31] 是一个输运模型，考虑核-核碰撞过程中物质的多个阶段，可以用于研究重离子碰撞中末态带电强子的 v_2。它由四个部分组成：初态条件、部分子级联、强子化和强子相互作用。

（1）初态条件由重离子喷注相互作用生成器 (HIJING)[32] 产生。HIJING 首先产生微喷注 (minijet) 和软激发弦。随后这些部分子会通过隆德 (Lund) 碎裂机制生成初始强子。Lund 弦碎裂模型是 AMPT 模型中的一个关键组成部分，用于描述强子化过程。Lund 弦碎裂函数由 HIJING 中的参数 a 和 b 决定，函数表达式为:$f(z) \propto z^{-1}(1-z)^a \exp(-bm_\perp^2/z)$，其中 z 是产生强子的光锥动量分数，横质量为 $m_\perp$。（2）在弦熔化机制作用下，这些初始强子依据它们的味与自旋结构被解离成部分子, 并进入随后的部分子级联（Zhang’s parton cascade, ZPC）过程[33]。ZPC 模型使用基于德拜屏蔽质量 μ 和强耦合常数 α_s 的截面：$\sigma_{gg} \approx \frac{9\pi\alpha_s^2}{2\mu^2}$，来计算部分子-部分子散射。（3）此外, 在部分子-部分子散射过程完成后, 部分子会进入到强子化阶段，坐标空间中距离最近的一（或两）个部分子结合成强子。（4）形成的强子随后进入强子再散射阶段，此阶段通过相对论输运（A Relativistic Transport，ART）模型[34] 处理，并在此过程考虑重子-重子、重子-介子和介子-介子相互作用的散射通道截面。

本研究采用带有弦熔化机制 AMPT 模型程序，对 d-Au 碰撞（在 $\sqrt{s_{NN}} = 200$ GeV）和 pp 碰撞（在 $\sqrt{s} = 200$ GeV）各自进行了大约 500 万次模拟事件的模拟。d-Au 碰撞中的事件中心度通过 AMPT 模拟中的碰撞参数 b 确定。为与本研究中所使用实验测量结果保持一致，以及基于既往研究成果和科研文献中常见的分类标准[11]，定义中心碰撞事件样本为 0-5% 中心度事件，边缘碰撞事件样本为 60-100%、80-100%中心度事件。

1.2　各向异性流的定义

方位各向异性流大小通过粒子方位分布的傅里叶展开来量化，表达式为:

$$\frac{d^2N}{dp_T d\varphi} = \frac{1}{2\pi}\frac{dN}{dp_T}\Big(1 + 2\sum_{n=1}^{\infty} v_n(p_T)\cos[n(\varphi - \Psi_n)]\Big), \quad (1)$$

其中 φ 是粒子的方位角，p_T 是粒子的横动量，Ψ_n 是实验室系反应平面的方位角，产生粒子的各向异性流由傅里叶系数 v_n 定义。傅里叶展开的前两个系数分别是直接流（direct flow）v_1 和椭圆流（elliptic flow）v_2。第二项傅里叶系数 v_2 对碰撞不对称性起主要贡献[3,35-36]，包含在 QGP 演化过程中，初始椭球状（或称杏仁状）碰撞区域的空间各向异性传导到末态动量空间，从而影响粒子方位角分布的信息。高能重离子碰撞实验观测到末态粒子显著的 $v_2 > 0$ 现象，是判断 QGP 物质形成的重要标准之一。

2　非流贡献减除方法

使用两粒子关联来提取方位各向异性流的方法在参考文献[8-13,37-40] 中广泛讨论。其方法是指将两带电关联粒子（记为 h-h）分别记为触发粒子和与其关联的关联粒子，两带电关联粒子之间的关联结果在相对方位角 $\Delta\phi$ ($-\frac{\pi}{2}$ 和 $\frac{3\pi}{2}$ 区间内）和赝快度差 $\Delta\eta$ 下进行计算。

本文的研究遵循 RHIC 能区实验中的分析方法[14]，使用 AMPT 模拟的事件包括 $0.5<p_T<3.5$ GeV/c 的末态带电强子，每对带电强子至少包括一个低 p_T 粒子 ($0.5<p_T<0.75$ GeV/c)。对于每对关联粒子, 在质心系中的赝快度差定义为 $\Delta\eta = \eta_{trig} - \eta_{assoc}$, 其中, η_{trig} 和 η_{assoc} 分别为触发粒子和关联粒子的赝快度。将粒子对赝快度差区间设定在 $0.48<|\Delta\eta|<0.7$。关联性以 Y 表示，即将每个触发粒子的关联产额定义为:

$$Y \equiv \frac{1}{N_{trig}}\frac{dN_{assoc}}{d\Delta\phi} - b_{ZYAM}, \quad (2)$$

其中, N_{trig} 是触发粒子总数, N_{assoc} 是关联粒子总数。研究使用零产额最小值（the zero-yield-at- minimum, ZYAM）方法[41-42], 即假设两带电强子的关联函数在最小值处为零。

公式 (2) 对应的关联产额 $Y_{0-5\%}$ 取自 d-Au 的 0 – 5% 中心碰撞事件，$Y_{60-100\%}$、$Y_{80-100\%}$ 分别取自 d-Au 的 60 – 100%、80 – 100% 边缘碰撞事件，Y_{pp} 取自 pp 碰撞事件。并定义 $\Delta Y_{中心-边缘}$ 为 d-Au 中心碰撞产额减去 d-Au 边缘碰撞产额，$\Delta Y_{中心-\text{pp}}$ 为 d-Au 中心碰撞产额减去 pp 碰撞产额，即：$\Delta Y_{中心-边缘} = Y_{0-5\%} - Y_{边缘}$ 和 $\Delta Y_{中心-\text{pp}} = Y_{0-5\%} - Y_{\text{pp}}$。这两种减法去除了结果中非流的贡献，包括喷注碎片、共振衰变等。使用公式 (3) 拟合去除非流贡献带电强子产额分布，该分布表现为两个以特定值 $\Delta\phi = 0$ 和 $\Delta\phi = \pi$ 为中心的峰。利用公式 (3) 提取 v_2:

$$\Delta Y = a_0 + \sum_{n=1}^{3} 2a_{\text{n}}\cos(n\Delta\phi) \tag{3}$$

定义 c_{n} 表示 n 阶各向异性:

$$c_{\text{n}} \equiv a_{\text{n}} / \left(b_{\text{ZYAM}} + a_0\right), \tag{4}$$

使用两粒子关联方法，将带电强子 h 的 $v_{\text{n}}^{\text{h}}\{2\text{PC}\}$ 系数定义为[11]:

$$v_{\text{n}}^{\text{h}}\{2\text{PC}\} = \sqrt{c_{\text{n}}^{\text{h-h}}} \tag{5}$$

3 结果和讨论

根据公式 (2) 给出的粒子关联产额定义，图 1 展示了在质心系中 0.48<$|\Delta\eta|$<0.7 赝快度差范围内，中心度为 0-5% 的 d-Au 中心碰撞 (绿色圆圈表示的 $Y_{0-5\%}$) 与 pp 碰撞 (蓝色方块表示的 Y_{pp}) 末态带电强子方位角分布。图 1 (a) 两粒子横动量区间均为 $0.5 < p_{\text{T}} < 0.75$ GeV/c，图 1 (b) 触发粒子横动量区间 $0.5 < p_{\text{T,trig}} < 0.75$ GeV/c，关联粒子横动量区间 $1.25 < p_{\text{T,assoc}} < 1.5$ GeV/c。黑色三角标记的曲线表示两者差值 $\Delta Y_{中心-\text{pp}} = Y_{0-5\%} - Y_{\text{pp}}$，描述 d-Au 中心碰撞相对于 pp 碰撞的修正产额。为量化这种差异，采用拟合函数 $a_0 + 2a_2\cos(2\Delta\phi)$，以红色实线表示，对 $\Delta Y_{中心-\text{pp}}$ 进行了拟合。

在图 2 中，给出了在赝快度差区间 0.48<$|\Delta\eta|$<0.7 内，d-Au 中心度为 0-5% 的中心碰撞 (绿色圆圈表示的 $Y_{0-5\%}$) 与 60-100% 的边缘碰撞 (蓝色方块表示的 $Y_{60-100\%}$) 的末态带电强子方位角分布产额的对比。黑色三角标记的曲线表示两者差值 $\Delta Y_{中心-边缘} = Y_{0-5\%} - Y_{60-100\%}$，描述 d-Au 中心碰撞相对于边缘碰撞的修正产额。为量化这种差异，采用相同的拟合函数 $a_0 + 2a_2\cos(2\Delta\phi)$，以红色实线表示，对 $\Delta Y_{中心-边缘}$ 进行了拟合。

类比图 2，考虑 80-100% 中心度的 d-Au 边缘碰撞，图 3 给出了去除非流效应前后末态带电强子方位角分布产额的对比图像。

从带有误差棒的图 1 至图 3可以明显看出，在相对方位角 $\Delta\phi$ 接近 0 和 π 时，$Y_{0-5\%}$ 明显大于 $\Delta Y_{中心-边缘}$ 和

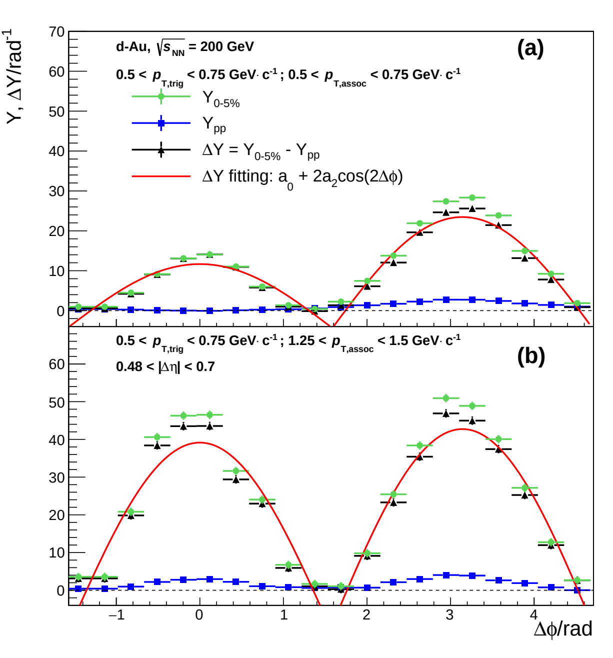


图 1 (在线彩图) 在质心系中赝快度差区间 0.48 < $|\Delta\eta|$ < 0.7，中心度为 0-5% 的 d-Au 中心碰撞 (绿色圆圈) 与 pp 碰撞 (蓝色方块) 的末态带电强子方位角分布产额的对比: (a) 触发粒子 $0.5 < p_{\text{T,trig}} < 0.75$ GeV/c，关联粒子 $0.5 < p_{\text{T,assoc}} < 0.75$ GeV/c; (b) 触发粒子 $0.5 < p_{\text{T,trig}} < 0.75$ GeV/c，关联粒子 $1.25 < p_{\text{T,assoc}} < 1.5$ GeV/c

$\Delta Y_{中心-\text{pp}}$，这表明 d-Au 碰撞中非流贡献在两粒子相对方位角为 0 和 π 附近时比较大。统计误差在方位角为 0 和 π 附近相对较小，约为 3% 左右。

根据公式 (4)，图 4给出了中心度为 0-5% 的 d-Au 中心碰撞中带电强子二阶各向异性 c_2 随粒子横动量 p_{T} 分布的图像。红色实线代表未去除非流效应的 0-5% 中心度 d-Au 中心碰撞结果。蓝色虚线、绿色短划线、粉色长划线分别表示 AMPT 模型下，通过减去 pp 碰撞、60-100% 和 80-100% 的 d-Au 边缘碰撞产额分布，从而达到去除非流效应之后的计算结果。

在横动量 p_{T} 大于 1 GeV/c 区间，带有非流效应的红色实线高于无非流效应的蓝色虚线、绿色短划线、粉色长划线，说明 d-Au 碰撞中非流贡献对 v_2 有一定的影响。通过分别减去两个不同中心度d-Au 边缘碰撞 (绿色短划线、粉色长划线) 或 pp 碰撞 (蓝色虚线) 中的每次触发产额分布，也就是去除了 0-5% 中心 d-Au 碰撞中的非流效应，发现三者随横动量的变化趋势近乎一致，表明去除非流贡献的两种方式对 c_2 值的影响无明显差别。

根据公式 (5)，图 5 (a) 给出了碰撞中心度为 0-5% 的 d-Au 碰撞中带电强子椭圆流 v_2 随横动量 p_{T} 分布的图像。其中红色实线是碰撞中心度 0-5% 的 d-Au 中心碰撞中具有非流效应的 v_2 随 p_{T} 的分布。非流效应的消除是通过将碰撞中心度 0-5% 的 d-Au 中心碰撞末态带电强

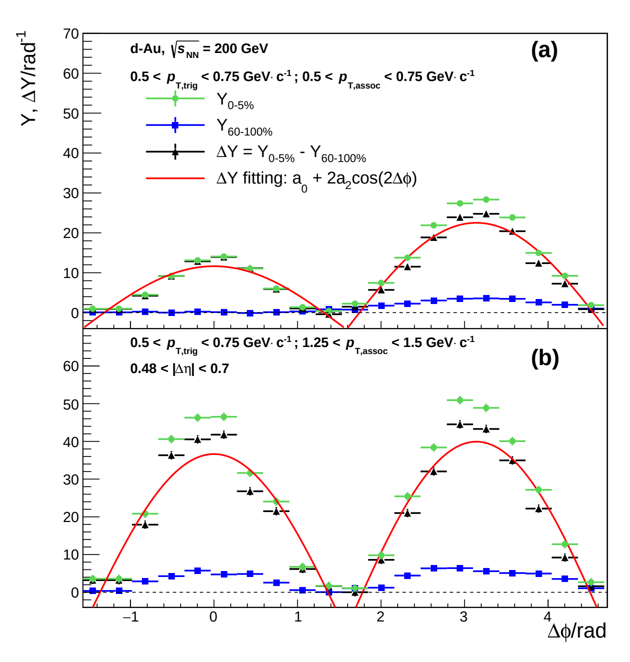


图 2 （在线彩图）在质心系中赝快度差区间 $0.48 < |\Delta\eta| < 0.7$, d-Au 中心度为 0-5% 的中心碰撞（绿色圆圈）与 60-100% 的边缘碰撞（蓝色方块）的末态带电强子方位角分布产额的对比：（a）触发粒子 $0.5 < p_{T,trig} < 0.75$ GeV/c, 关联粒子 $0.5 < p_{T,assoc} < 0.75$ GeV/c；（b）触发粒子 $0.5 < p_{T,trig} < 0.75$ GeV/c，关联粒子 $1.25 < p_{T,assoc} < 1.5$ GeV/c

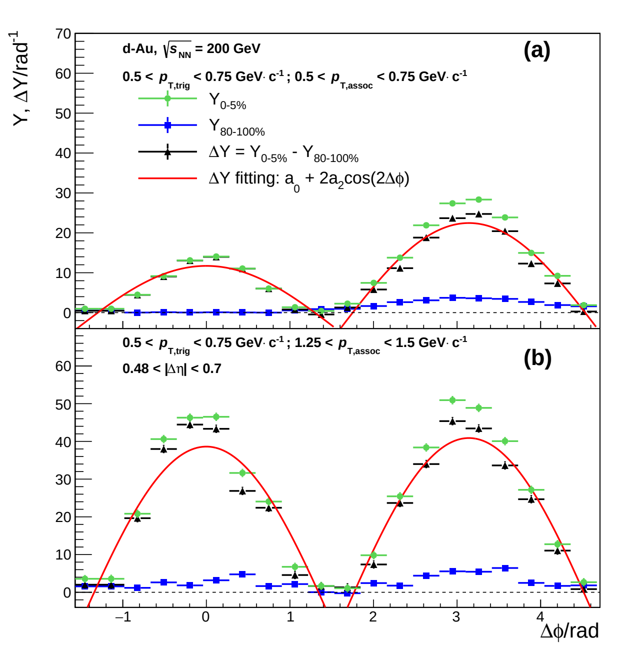


图 3 （在线彩图）在质心系中赝快度差区间 $0.48 < |\Delta\eta| < 0.7$, d-Au 中心度为 0-5% 的中心碰撞（绿色圆圈）与 80-100% 的边缘碰撞（蓝色方块）的末态带电强子方位角分布产额的对比：（a）触发粒子 $0.5 < p_{T,trig} < 0.75$ GeV/c, 关联粒子 $0.5 < p_{T,assoc} < 0.75$ GeV/c；（b）触发粒子 $0.5 < p_{T,trig} < 0.75$ GeV/c，关联粒子 $1.25 < p_{T,assoc} < 1.5$ GeV/c

子产额减去 d-Au 边缘碰撞或是减去 pp 碰撞末态带电强子产额分布来实现，这两种去除非流效应方式的 v_2 随 p_T 的分布在图中由蓝色虚线、绿色短划线、粉色长划线表示。PHENIX 实验测量碰撞中心度 0-5% 的 d-Au 中心碰撞的 v_2 随 p_T 的分布结果由黑色圆圈线表示[15]。从图中可以观察到，带电强子的 v_2 值随横动量 p_T 增加而增加。这是因为在较高的 p_T 区域，粒子更容易受到初始碰撞几何空间各向异性的影响。图中的红色实线代表包含非流效应的结果，其值高于去除非流效应的结果，这从理论上证明了，非流效应对椭圆流 v_2 有影响。蓝色虚线、绿色短划线、粉色长划线结果非常接近，表明在中心度 0-5% 的 d-Au 碰撞中, 非流效应（例如喷注关联或共振衰变）对 v_2 的影响并不显著依赖于去除非流效应的方法。这两种去除非流效应的方式，即通过减去 d-Au 边缘碰撞系统或 pp 碰撞系统中的产额分布，产生的结果相似。带电强子 v_2 从 AMPT 模型计算得出和从 PHENIX 实验数据得出相比较而言，v_2 值均随横动量增加而增加, 两者偏差小，并且非流贡献减除后的理论计算能够更好地描述现有实验数据。

在图 5（b）中，给出了 AMPT 模型下 v_2 比率随横动量 p_T 分布的图像。通过分析发现，AMPT 模型下 d-Au 中心碰撞分别减去 60-100%、80-100% d-Au 边缘碰撞末

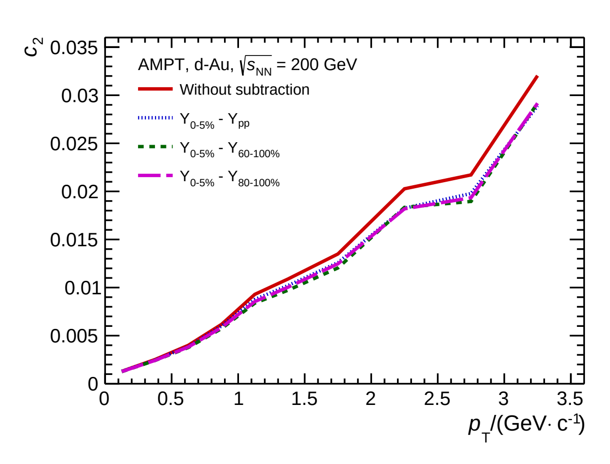


图 4 （在线彩图）碰撞中心度为 0-5% 的 d-Au 中心碰撞的带电强子二阶各向异性 c_2 随粒子横动量 p_T 分布的图像

态带电强子产额分布的 v_2，与 d-Au 中心碰撞减去 pp 碰撞末态带电强子产额分布的 v_2 比率随横动量 p_T 的分布，由黑色虚线、红色短划线表示。结果显示理论上，分别选择 60-100%、80-100% 的中心度作为边缘碰撞时，两种去除非流效应方法在横动量到达 3.5 GeV/c 的差别分别小于 2% 和 1.4%。这表明不同减除方案的理论预言相近。此外，AMPT 模型下 d-Au 中心碰撞减去 d-Au 边缘碰撞末态带电强子产额分布的 v_2，与没有减去非流效应

的 d-Au 中心碰撞末态带电强子产额分布的 v_2 比率随横动量 p_T 的分布，由蓝色长划线表示，其与比率 1 的最大偏差小于 6%。这表明 d-Au 碰撞中非流效应对椭圆流有一定的影响。值得注意的是，在图中可以观察到蓝色长划线在较高 p_T 处的比率值略小于较低 p_T 处，与比率 1 的偏差在较高 p_T 处略大于较低 p_T 处，这表明非流贡献可能因 p_T 的分布不同而有所不同，这是由于在不同 p_T 范围内对粒子产生有贡献的不同物理机制。

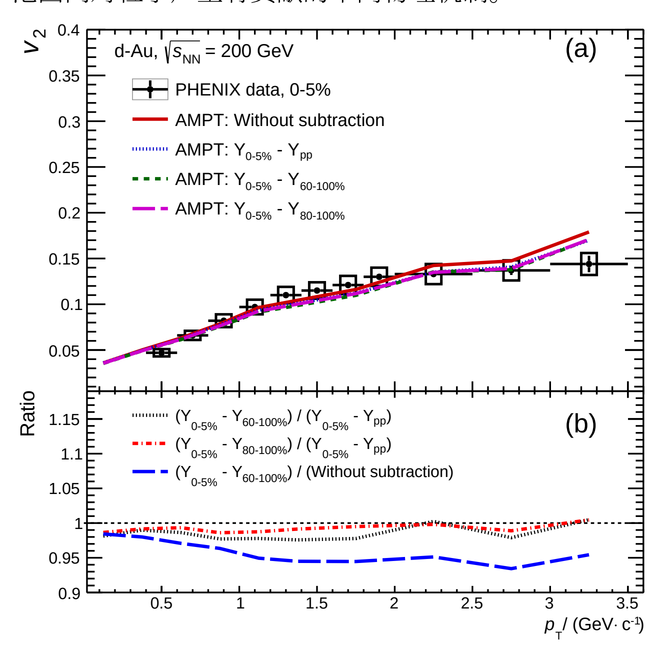


图 5 （在线彩图）(a) 图为 AMPT 模型下碰撞中心度 0-5% 的 d-Au 中心碰撞的带电强子椭圆流 v_2 随横动量 p_T 分布的图像。PHENIX 实验测量碰撞中心度 0-5% 的 d-Au 中心碰撞的 v_2 随 p_T 的分布结果由黑色圆圈线表示。[15] (b) 图为 AMPT 模型下 v_2 比率随横动量 p_T 分布的图像

4 总结

本文首先对 AMPT 模型进行了简要介绍，随后详细阐述了非流贡献减法的方法和步骤。最后，给出了研究结果，并对结果进行深入讨论和总结，以期为理解非流贡献提供更全面的视角。

在本研究中，AMPT 模型被用来研究 d-Au 碰撞在 $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV 时的椭圆流 v_2 行为。在 $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV 的 d-Au 碰撞中计算了带电强子两粒子相对方位角关联，当相对方位角 $\Delta\phi$ 接近 0 和 π 时，$Y_{0-5\%}$ 明显大于 $\Delta Y_{中心-边缘}$ 和 $\Delta Y_{中心-pp}$。并从这些关联中通过拟合和计算得到二阶系数 v_2，作为 p_T 的分布进行研究。通过减去 $\sqrt{s_{NN}}$ = 200 GeV 下以 60-100%、80-100% 中心度的 d-Au 边缘碰撞或 $\sqrt{s}$ = 200 GeV 的 pp 碰撞中的末态带电强子产额分布，去除了 d-Au 中心碰撞中的非流效应。这两种去除非流效应的方法给出了近乎一致的结果，表明非流效应对 v_2 的影响并不显著依赖于减去 d-Au 边缘碰撞或 pp 碰撞系统中的末态带电强子产额分布。同时，考虑分别选取中心度为 60-100%、80-100% 的边缘碰撞，发现两种非流效应减除方法理论预言相近。

将从 AMPT 模型计算得出带电强子 v_2 和从 PHENIX 实验数据得出的 v_2 进行拟合比较，结果发现，带电强子的 v_2 值随着横动量 p_T 的增加而增加，表明在较高的 p_T 区域，粒子更容易受到初始碰撞几何空间各向异性的影响。通过分析 p_T 函数的非流贡献比率，可以深入了解重离子碰撞中粒子产生的物理效应。不同 p_T 范围内对粒子产生有贡献的物理机制不同，在低 p_T 下，共振衰变可能占主导地位，而在高 p_T 下，类似喷注的关联可能起主要贡献。

本研究基于 AMPT 模型在 d-Au 碰撞中同时考虑两种非流贡献减除方法，并且对比选取的两个边缘碰撞中心度对研究结果的影响，从理论上证明减除边缘碰撞或 pp 碰撞对非流贡献减除的结果相近。目前本研究仅考虑 AMPT 模型下 d-Au 碰撞中非流贡献对椭圆流 v_2 的影响，然而实际上非流贡献也会对高阶流系数 v_3 产生作用。基于本工作研究方法，对 AMPT 模型下 d-Au 碰撞中非流贡献对 v_3 的影响进行系统研究，可以为研究小碰撞系统中非流贡献减除方法的研究人员提供更多理论参考。

参考文献

[1] MULLER B, NAGLE J L. Ann Rev Nucl Part Sci, 2006, 56: 93. DOI: 10.1146/annurev.nucl.56.080805.140556.

[2] BUSZA W, RAJAGOPAL K, VAN DER SCHEE W. Ann Rev Nucl Part Sci, 2018, 68: 339. DOI: 10.1146/annurev-nucl-101917-020852.

[3] OLLITRAULT J Y. Phys Rev D, 1992, 46: 229. DOI: 10.1103/PhysRevD.46.229.

[4] KIM B. J Korean Phys Soc, 2023, 82(6): 557. DOI: 10.1007/s40042-023-00717-w.

[5] ESKOLA K J, PAAKKINEN P, PAUKKUNEN H, et al. Eur Phys J C, 2017, 77(3): 163. DOI: 10.1140/epjc/s10052-017-4725-9.

[6] AIDALA C, et al. Phys Rev C, 2019, 99(4): 044912. DOI: 10.1103/PhysRevC.99.044912.

[7] KANG Z B, VITEV I, WANG E, et al. Phys Lett B, 2015, 740: 23. DOI: 10.1016/j.physletb.2014.11.024.

[8] CHATRCHYAN S, et al. Phys Lett B, 2013, 718: 795. DOI: 10.1016/j.physletb.2012.11.025.

[9] ABELEV B, et al. Phys Lett B, 2013, 719: 29. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.01.012.

[10] AAD G, et al. Phys Rev Lett, 2013, 110(18): 182302. DOI: 10.1103/PhysRevLett.110.182302.

[11] ABELEV B B, et al. Phys Lett B, 2013, 726: 164. DOI: 10.1016/j.physletb.2013.08.024.

[12] AABOUD M, et al. Phys Rev C, 2017, 96(2): 024908. DOI: 10.1103/PhysRevC.96.024908.

[13] AAIJ R, et al. Phys Lett B, 2016, 762: 473. DOI: 10.1016/j.physletb.2016.09.064.

[14] ADARE A, et al. Phys Rev Lett, 2013, 111(21): 212301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.212301.
[15] ADARE A, et al. Phys Rev Lett, 2015, 114(19): 192301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.114.192301.
[16] ADAMCZYK L, et al. Phys Lett B, 2015, 747: 265. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.05.075.
[17] ABDULHAMID M I, et al. Phys Rev Lett, 2023, 130(24): 242301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.130.242301.
[18] ADARE A, et al. Phys Rev Lett, 2015, 115(14): 142301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.115.142301.
[19] BORGHINI N, DINH P M, OLLITRAULT J Y. Phys Rev C, 2000, 62: 034902. DOI: 10.1103/PhysRevC.62.034902.
[20] BORGHINI N, DINH P M, OLLITRAULT J Y. Phys Rev C, 2001, 63: 054906. DOI: 10.1103/PhysRevC.63.054906.
[21] WANG F. Phys Rev C, 2010, 81: 064905. DOI: 10.1103/PhysRevC.81.064905.
[22] ACHARYA S, et al. Phys Rev Lett, 2019, 123(14): 142301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.123.142301.
[23] ALVER B, et al. Phys Rev C, 2010, 81: 034915. DOI: 10.1103/PhysRevC.81.034915.
[24] FENG Y, WANG F. J Phys G, 2025, 52(1): 013001. DOI: 10.1088/1361-6471/ad903b.
[25] AAD G, et al. Phys Rev C, 2014, 90(4): 044906. DOI: 10.1103/PhysRevC.90.044906.
[26] PAĆK V. Nucl Phys A, 2019, 982: 451. DOI: 10.1016/j.nuclphysa.2018.09.020.
[27] AAD G, et al. Eur Phys J C, 2020, 80(1): 73. DOI: 10.1140/epjc/s10052-020-7624-4.
[28] LIN Z W, KO C M, LI B A, et al. Phys Rev C, 2005, 72: 064901. DOI: 10.1103/PhysRevC.72.064901.
[29] ZHENG L, LIU L, LIN Z W, et al. Eur Phys J C, 2024, 84(10): 1029. DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13378-1.
[30] ZHENG L, ZHANG G H, LIU Y F, et al. Eur Phys J C, 2021, 81(8): 755. DOI: 10.1140/epjc/s10052-021-09527-5.
[31] ZHANG C, ZHENG L, SHI S, et al. Eur Phys J C, 2024, 84(9): 942. DOI: 10.1140/epjc/s10052-024-13265-9.
[32] WANG X N, GYULASSY M. Phys Rev D, 1991, 44: 3501. DOI: 10.1103/PhysRevD.44.3501.
[33] ZHANG B. Comput Phys Commun, 1998, 109: 193. DOI: 10.1016/S0010-4655(98)00010-1.
[34] LI B A, KO C M. Phys Rev C, 1995, 52: 2037. DOI: 10.1103/PhysRevC.52.2037.
[35] VOLOSHIN S, ZHANG Y. Z Phys C, 1996, 70: 665. DOI: 10.1007/s002880050141.
[36] ZHU J, WU X Y, QIN G Y. Chin Phys C, 2025, 49(4): 044103. DOI: 10.1088/1674-1137/ada7d1.
[37] ADAM J, et al. Phys Lett B, 2016, 753: 126. DOI: 10.1016/j.physletb.2015.12.010.
[38] ACHARYA S, et al. Phys Lett B, 2018, 780: 7. DOI: 10.1016/j.physletb.2018.02.039.
[39] ACHARYA S, et al. Phys Rev Lett, 2019, 122(7): 072301. DOI: 10.1103/PhysRevLett.122.072301.
[40] OLLITRAULT J Y. Eur Phys J A, 2023, 59(10): 236. DOI: 10.1140/epja/s10050-023-01157-7.
[41] LUZUM M. Phys Lett B, 2011, 696: 499. DOI: 10.1016/j.physletb.2011.01.013.
[42] TANG S Y, ZHENG L, ZHANG X M, et al. Nucl Sci Tech, 2024, 35(2): 32. DOI: 10.1007/s41365-024-01387-4.

Study on the influence of non-flow contribution on elliptic flow in d-Au collision using AMPT model

Zhang Meimei[1, 2, 3, 4], Li Shuang[1, 2], Zhang Zuman[3, 4]

(*1. College of Mathematics and Physics, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei,China;*
2. Center for Astronomy and Space Sciences, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, China;
3. School of Physics and Mechanical & Electrical Engineering, Hubei University of Education, Wuhan 430205, Hubei, China;
4. Institute of Theoretical Physics, Hubei University of Education, Wuhan 430205, Hubei, China)

Abstract: This study employs the AMPT (A Multi-Phase Transport) model to analyze the elliptic flow (v_2) distribution characteristics of charged hadrons produced in d-Au collisions at a collision energy of 200 GeV. The focus is on investigating the influence of non-flow sources (such as jet fragments and resonance decays) on v_2 in this small collision system. We utilize a non-flow contribution subtraction method, which involves subtracting the charged hadron yield from central d-Au collisions (centrality 0-5%) from the yield in peripheral d-Au collisions (centrality 60-100% or 80-100%) or pp collisions at the same collision energy, to eliminate the effects of non-flow. We systematically study the impact of non-flow effects on the v_2 of charged hadrons and the dependence of v_2 on different subtraction schemes. The research finds that theoretical calculations after subtracting non-flow contributions can better describe existing experimental data; theoretical predictions from different subtraction schemes are similar. This study theoretically demonstrates that in the non-flow contribution subtraction method, the impact of subtracting results from peripheral collisions or pp collisions on the final theoretical predictions is minimal. This provides a theoretical basis for researchers to remove non-flow contributions in experiments with small collision systems, and the related theoretical calculations also offer a theoretical reference for subsequent experimental measurements.

Key words: A multi-phase transport model (AMPT); Non-flow contribution subtraction; d-Au collisions; Elliptic flow (v_2)

Received date: 10 Mar. 2025; **Revised date:** 10 Mar. 2025

Foundation item: the National Natural Science Foundation of China(12375137); Key Laboratory of Quark & Lepton Physics of Ministry of education, Central China Normal University(QLPL2024P01)

Corresponding author: Li Shuang, E-mail: lish@ctgu.edu.cn

Corresponding author: Zhang Zuman, E-mail: zuman.zhang@hue.edu.cn